

# Caracterización de la celda unidad de una lente “zurda” plana para la excitación de antenas planas de ranuras

A. García Aguilar

Departamento de Señales,  
Sistemas y Radiocomunicaciones.  
E.T.S.I Telecomunicación.  
Universidad Politécnica de Madrid  
e-mail :  
[andresg@gr.ssr.upm.es](mailto:andresg@gr.ssr.upm.es)

J.M. Fernández

Departamento de Señales, Sistemas y  
Radiocomunicaciones.  
E.T.S.I Telecomunicación.  
Universidad Politécnica de Madrid  
e-mail :  
[jmfdez@gr.ssr.upm.es](mailto:jmfdez@gr.ssr.upm.es)

M. Sierra Castañer

Departamento de Señales, Sistemas y  
Radiocomunicaciones.  
E.T.S.I Telecomunicación.  
Universidad Politécnica de Madrid  
e-mail :  
[m.sierra.castaner@gr.ssr.upm.es](mailto:m.sierra.castaner@gr.ssr.upm.es)

**Abstract** - “Metamaterials” are artificially engineered structured materials exhibiting novel properties due to their special architecture and not because of the constituent homogeneous materials used to manufacture them. This enables to design new materials with characteristics not available in conventional materials, as a negative refractive index. A new form of excitation for parallel plate slot antennas based in a planar “left handed” lens is proposed in [1]. This excitation allows enhancing the efficiency of these kinds of antennas. The lens is constructed using the well known “mushroom” structure. Here the characterization of the left handed lens with the mushroom structure in terms of their geometrical parameters (lattice constant, diameter of via, height of substrate) is presented using the dispersion diagram of the unit cell. Some simulations results are shown.

## I. INTRODUCCIÓN

Las antenas de ranuras situadas sobre una guía de placas paralelas son ampliamente utilizadas y proporcionan una alta ganancia y eficiencia. Además, su fabricación es sencilla y altamente repetible. La propia guía de placas paralelas distribuye el campo en amplitud y en fase excitando las ranuras [2].

Para excitar una onda plana en una guía de placas paralelas existen varios métodos [3]: usando una bocina o un reflector parabólico convencional, cuya fabricación es complicada; mediante una guía rectangular a la que se aplican una serie de ranuras o con una red de alimentación construida con tecnología microstrip, que no generan un modo TEM del todo uniforme [4, 5].

Se ha propuesto recientemente una nueva forma de excitación para guías de placas paralelas basada en una lente construida con “metamateriales” [6]. Los metamateriales son estructuras artificiales periódicas que pueden ser diseñadas para cumplir algunas propiedades electromagnéticas singulares dentro de un rango de frecuencias determinado: propagación de ondas de retroceso, refracción negativa, presencia de bandas prohibidas, etc. En particular los “metamateriales zurdos”, conocidos en la literatura inglesa como “left handed”, presentan simultáneamente una

permitividad  $\epsilon_r$  y una permeabilidad  $\mu_r$  negativas, que derivan en un índice de refracción negativo, según la teoría especulativa del físico ruso Veselago en 1968 [7]. Los medios zurdos presentan propiedades opuestas a las de un “medio convencional”, o en inglés “right handed”, como, a parte de un índice de refracción negativo, la inversión del desplazamiento Doppler, cambios en las ecuaciones de Fresnel o en el principio de Fermat.

La lente plana construida con metamateriales zurdos se ha propuesto como una nueva forma de alimentación para antenas planas de ranuras [1]. La lente zurda interseca con un medio convencional a través de una interfaz parabólica, lo que permite excitar una onda cilíndrica en el foco de la lente que se transforma en una onda plana por efecto de la refracción negativa en la interfaz entre el medio zurdo y el convencional, como ya se ha demostrado [8]. Ambos medios deben cumplir la condición de tener densidades electromagnéticas equivalentes, es decir,  $n_{\text{medio convencional}} = n_{\text{medio zurdo}}$ .

Para la construcción de la lente plana con un medio zurdo ha sido propuesta por Caloz la conocida estructura en forma de “seta”, o “mushroom” en la terminología anglosajona [9]. Inicialmente fue utilizada por Sievenpiper como superficie de alta impedancia [10]. Las principales ventajas de la estructura en forma de seta son su bajo coste y la facilidad de fabricación mediante tecnología planar. En la Fig. 1 se presenta dicha estructura, además del detalle de su celda unidad con la nomenclatura de sus parámetros y un esquema de la antena plana de ranuras [3] con la lente zurda excitando.

El diagrama de dispersión de la estructura en forma de seta, basado en el análisis mediante teoría de líneas de transmisión [11], muestra las bandas de frecuencias y los modos que se propagan por la estructura. Por lo que el objetivo es diseñar una celda unidad de la estructura en forma de seta, utilizando la información contenida en los diagramas de dispersión, que pueda fabricarse con la tecnología habitual de circuitos impresos y que conforme una lente plana que funcione como un medio zurdo a una frecuencia de 12GHz. De esta forma es posible conseguir excitar la antena de ranuras con una distribución de campo mucho más uniforme en el interior de la guía de placas paralelas, mejorando la apertura de iluminación de las ranuras y aumentando la eficiencia de este tipo de antenas.

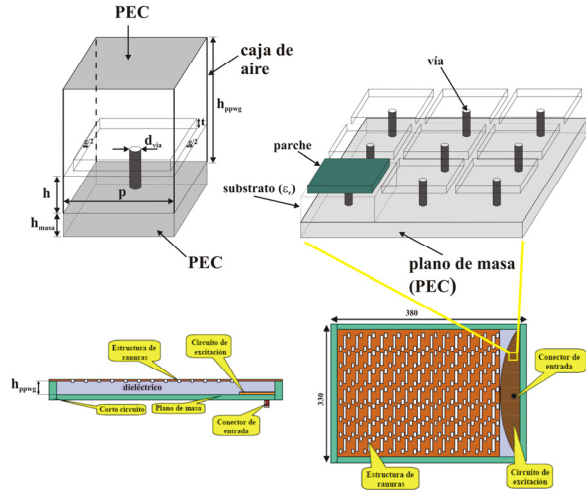


Fig. 1: Estructura de "seta" (arriba-derecha), su celda unidad (arriba-izquierda) y antena de ranuras con la lente zurda (abajo).

## II. DISEÑO DE LA CELDA UNIDAD

### A. Extracción del diagrama de dispersión.

El diagrama de dispersión muestra la relación entre la frecuencia y la fase de la onda  $f-\beta p$ . En una estructura periódica existirán varios modos en diferentes direcciones. Brillouin, en su teoría sobre la propagación de ondas sobre estructuras periódicas [12], estableció que para cualquier estructura periódica existen ciertas direcciones en la celda unidad de la estructura que forman una región de contorno de propagación llamada la "irreducible zona de Brillouin". Así, el problema de calcular los modos de propagación a una cierta frecuencia en la celda unidad se reduce a encontrar estos modos únicamente en las direcciones definidas por los vectores de la irreducible zona de Brillouin. Para el caso de la celda unidad de la estructura en forma de seta la irreducible zona de Brillouin, también llamada triángulo de Brillouin, se muestra en la Fig. 2, y consiste en las direcciones de propagación indicadas por los puntos: de  $\Gamma$  a X, de X a M y de M a  $\Gamma$ .

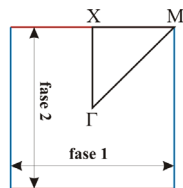


Fig. 2: La irreducible zona de Brillouin de la celda unidad de una estructura en forma de seta (vista de la planta).

Por consiguiente, el diagrama de dispersión de la celda unidad consistirá en tres regiones, una por cada dirección del triángulo de Brillouin. En cada región, la fase  $\beta p$  se traduce como la diferencia de fase entre los lados de la celda unidad, llamados *fase 1* y *fase 2* en la Fig. 2. Esta traslación permite obtener el diagrama de dispersión para cada lado del triángulo de Brillouin con simuladores electromagnéticos de onda completa. Para el caso en el que la onda se propague por el espacio libre relleno únicamente con dieléctrico, donde no hay dispersión, el diagrama constituirá una línea recta en la primera y tercera región, que se denomina línea de luz o "light" en inglés.

Los simuladores electromagnéticos de onda completa utilizados son *CST Microwave Studio* y *Ansoft HFSS*. Con el

objetivo de validar estos simuladores y comprobar que se pueden utilizar para extraer el diagrama de dispersión de la celda unidad correctamente, simulamos una celda de la que conocemos su diagrama de dispersión. Ésta es la utilizada por Caloz en [8], donde se demuestra que a una frecuencia de 5GHz esta celda tiene un índice de refracción negativo. Las dimensiones y demás parámetros de esta celda unidad, según la nomenclatura utilizada en la Fig. 1, son los indicados en la Tabla 1.

Parámetros	Magnitud (mm)	Parámetros	Magnitud (mm)
$p$	5	$d_{via}$	0.2
$g$	0.2	$h_{masa}$	1
$t$	0.5	$h_{ppwg}$	6
$h$	1.57	$\epsilon_r$	2.17

Tabla 1: Parámetros de la celda unidad simulada para validar el software.

El diagrama de dispersión y la gráfica de índices de refracción (computada como  $|n|=c\beta/\omega$  de la anterior) pueden verse en la Fig. 3 y 4, respectivamente. Se observa comportamiento de medio zurdo en las zonas con pendiente negativa en el diagrama de dispersión. Los resultados en los dos simuladores son prácticamente idénticos y coinciden con los obtenidos por Caloz en [8].

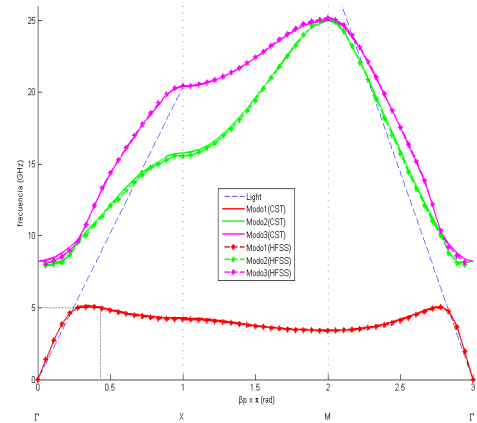


Fig. 3: Diagrama de dispersión de la celda unidad simulada para validar el software de los tres primeros modos en CST y HFSS.

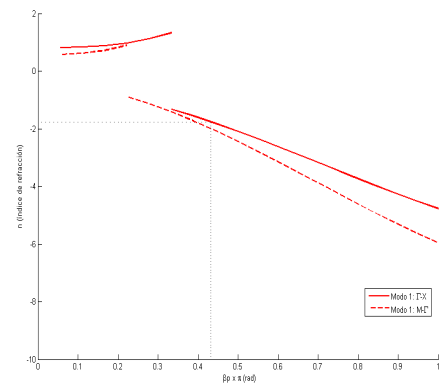


Fig. 4: Índices de refracción de la celda unidad simulada para validar el software del modo fundamental.

### B. Estudio paramétrico.

Antes de proceder a realizar un simple escalado en las dimensiones de la celda, que se sabe tiene un comportamiento de medio zurdo a 5GHz, a 12GHz se ha

realizado un estudio paramétrico donde se ha podido comprobar el efecto en el diagrama de dispersión y en los índices de refracción al modificar alguno de los parámetros geométricos de la celda unidad.

La Fig. 5 y 6, respectivamente, muestran el diagrama de dispersión y los índices de refracción de la celda unidad variando el espesor del sustrato  $h(mm) = [0.5, 0.785, 1.57, 3.14]$ . Igualmente, la Fig. 7 y 8, respectivamente, muestran el diagrama de dispersión y los índices de refracción variando la distancia entre parches  $g(mm) = [0.1, 0.2, 0.4, 0.8]$ . Y finalmente, la Fig. 9 y 10, respectivamente, muestran la variación del diámetro de la vía  $d_{via}(mm) = [0.1, 0.2, 0.6, 1]$ .

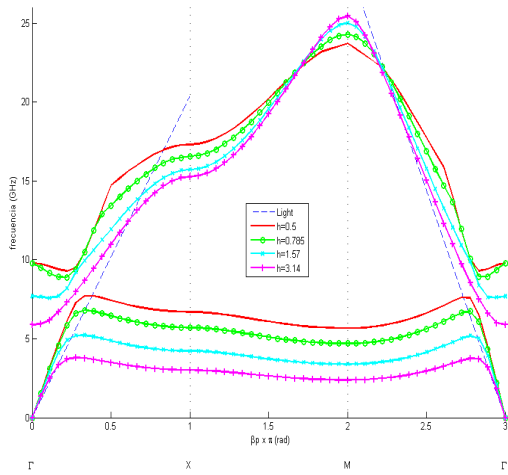


Fig. 5: Diagramas de dispersión de la celda unidad variando el espesor del sustrato  $h$  de los dos primeros modos.

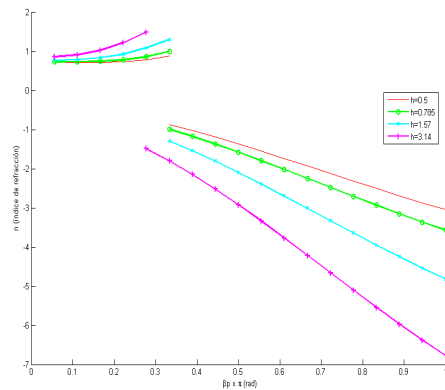


Fig. 6: Índices de refracción de la celda unidad variando el espesor del sustrato  $h$  del modo fundamental en la dirección  $\Gamma$ -X.

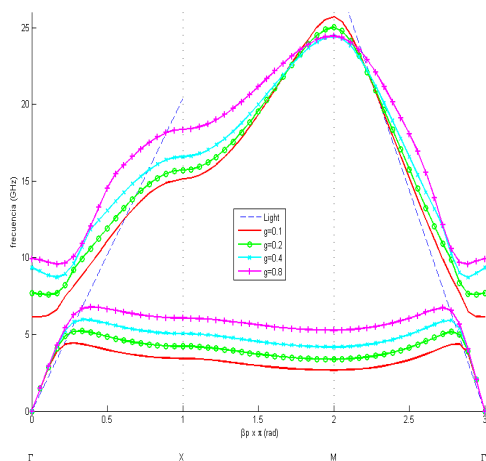


Fig. 7: Diagramas de dispersión de la celda unidad variando la distancia entre parches  $g$  de los dos primeros modos.

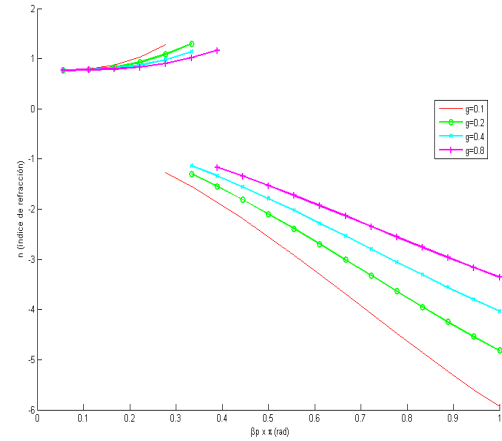


Fig. 8: Índices de refracción de la celda unidad variando la distancia entre parches  $g$  del modo fundamental en la dirección  $\Gamma$ -X.

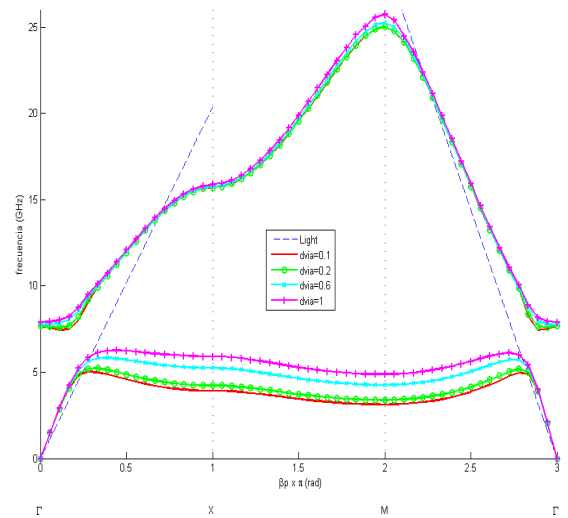


Fig. 9: Diagramas de dispersión de la celda unidad variando el diámetro de la vía  $d_{via}$  de los dos primeros modos.

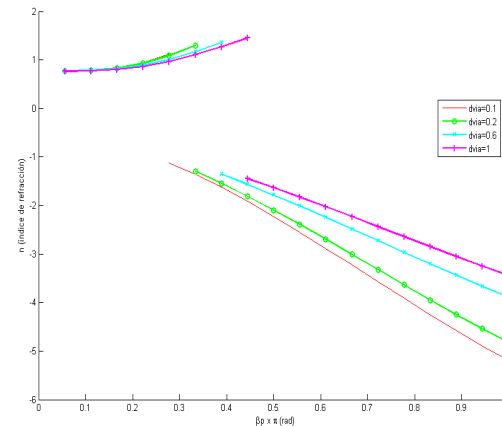


Fig. 10: Índices de refracción de la celda unidad variando el diámetro de la vía  $d_{via}$  del modo fundamental en la dirección  $\Gamma$ -X.

Por tanto se concluye que la banda de frecuencias a las que hay comportamiento de medio zurdo:

- Disminuye al aumentar  $h$ .
- Aumenta al aumentar  $g$ .
- Aumenta al aumentar  $d_{via}$ .

El mismo comportamiento presenta el índice de refracción, entendiendo por aumentar que se acerca a 0 y por disminuir que se hace más negativo.

### C. Celda unidad a 12GHz.

Haciendo uso del anterior estudio paramétrico, teniendo en cuenta las limitaciones impuestas para la fabricación de la lente mediante circuitos impresos y aplicando a las dimensiones de la celda anterior escalados en frecuencia, se ha conseguido una celda unidad que presenta un comportamiento de medio zurdo y un índice de refracción negativo a 12GHz. Los parámetros de esta celda unidad son los indicados en la Tabla 2.

Parámetros	Magnitud (mm)	Parámetros	Magnitud (mm)
$p$	3.2	$d_{via}$	0.6
$g$	0.2	$h_{masa}$	0.6
$t$	0.3	$h_{ppwg}$	2.5
$h$	0.762	$\epsilon_r$	2.17

Tabla 2: Parámetros de la celda unidad con comportamiento de medio zurdo a 12GHz

El diagrama de dispersión y los índices de refracción simulados en CST y en HFSS se muestran en las Fig. 11 y 12, respectivamente.

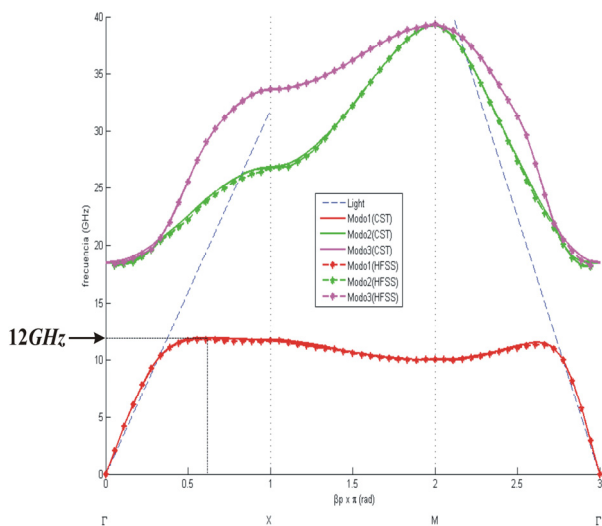


Fig. 11: Diagrama de dispersión de la celda unidad con comportamiento de medio zurdo a 12GHz de los tres primeros modos en CST y HFSS.

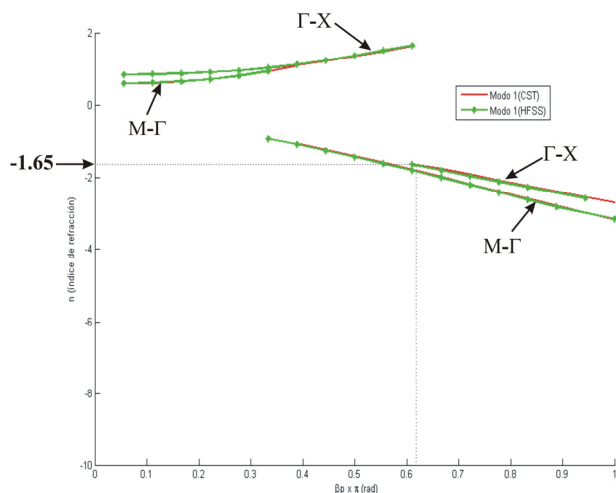


Fig. 12: Índices de refracción de la celda unidad con comportamiento de medio zurdo a 12GHz del modo fundamental en CST y HFSS.

## II. CONCLUSIONES

Una nueva forma de diseño de una lente zurda plana para alimentar una antena plana de ranuras sobre una guía de placas paralelas ha sido presentada. Se ha realizado para ello un estudio paramétrico de cómo afectan las variaciones de las dimensiones de la celda unidad al diagrama de dispersión y a los índices de refracción. Y se ha conseguido un modelo de celda que presenta un índice de refracción negativo a la frecuencia de trabajo de la antena de ranuras, 12GHz. El siguiente paso sería simular la lente completa con las dimensiones de la celda dadas mediante un simulador de onda completa, para comprobar que realiza correctamente la transformación de onda cilíndrica a onda plana. Además de construirla y medirla convenientemente, comprobando que, efectivamente, mejora la apertura de iluminación de las ranuras y, por tanto, la eficiencia de radiación de la antena completa. Estos resultados de la lente completa se mostrarán en la presentación que se hará para la URSI.

## REFERENCIAS

- [1] Y. Weitsch, J.M. Fernández, M. Sierra-Castañer, "A Planar Left-Handed Lens for Plane TEM Wave Excitation in Parallel Plate Slot Antennas", *Joint XX Spanish URSI/ACE Network of Excellence Meeting*, pp. 155, September 2005.
- [2] C.A. Balanis, "Antenna Theory, Analysis and Design", 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley and Sons, 1997.
- [3] T. Kai, J. Hirokawa and M. Ando, "Analysis of a Feeding Structure for TEM Wave Excitation in a Oversized Rectangular Waveguide", *Antennas and Propagation Society International Symposium IEEE*, Vol. 2, pp. 1177-1180, June 2003.
- [4] M. Sierra Castañer, "Contribución a las Técnicas de Diseño y Análisis de Antenas de Ranuras sobre placas paralelas", *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Madrid, junio 2000.
- [5] M. Sierra-Castañer, M. Vera-Isasa, M. Sierra-Pérez, J.L. Fernández Jambrina, "Double-Beam Parallel-Plate Slot Antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no 3, pp. 977 – 984, March 2005.
- [6] T. Itoh, "Novel Artificial Metamaterial Concepts and Structures for Microwave Applications", 2<sup>nd</sup> International PhD School on selected Topics in Applied Electromagnetics (Metamaterials and RF MicroElectroMechanical Systems), Perugia, Italy, September 2003.
- [7] V.G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ", *Sov. Phys. Usp.*, pp.509-514, 1968.
- [8] A. Lai, T. Itoh and C. Caloz, "Quasi-Optical Manipulations of Microwaves using metamaterial curved interfaces", invited to special session "Sources and Discontinuities in Metamaterials", *IEEE AP-S USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Washington, D.C., June 2005, to appear.
- [9] C. Caloz, A. Lai and T. Itoh, "Wave interactions in a Left-Handed Mushroom Structure", 2004 *IEEE AP-S International Symposium Digest*, Vol.2, pp.1403-1406, June 2004.
- [10] D. Sievenpiper, L. Zhang, R.F.J. Broas, N.G. Alexopolous and E. Yablonovitch, "High Impedance Surface Electromagnetic Surfaces with a forbidden frequency band", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47, N°11, pp.2059-2074, November 1999.
- [11] A. Lai, C. Caloz, T. Itoh, "Composite right/left-handed transmission line metamaterials," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 5, no. 3, pp. 34-50, September 2004.
- [12] L. Brillouin, "Wave Propagation in Periodic Structures, Electric Filters and Crystal Lattices", McGraw-Hill, 1946.